

SINTESIS ASAM OLEAT TEREPOKSIDASI DENGAN KATALIS ASAM ASETAT

Muhammad Ghozali, Yenny Meliana, Sri Fahmiati, Evi Triwulandari,
dan Akhmad Darmawan

Pusat Penelitian Kimia LIPI, Kawasan Puspiptek Serpong 15314

E-mail : muhammad.ghozali@lipi.go.id

Received : 2 November 2017; revised : 22 November 2017; accepted : 28 Mei 2018

ABSTRAK

SINTESIS ASAM OLEAT TEREPOKSIDASI DENGAN KATALIS ASAM ASETAT. Pada penelitian ini, sintesis asam oleat terepoksidasi dilakukan dengan tujuan mempelajari pengaruh konsentrasi asam asetat dan hidrogen peroksida pada proses epoksidasi asam oleat tanpa menggunakan katalis. Reaksi epoksidasi asam oleat dilakukan pada suhu 60 °C selama 5 jam dengan kecepatan pengadukan sekitar 525 rpm. Karakterisasi terhadap produk asam oleat terepoksidasi dilakukan dengan melakukan analisis bilangan iod, analisis bilangan oksiran, analisis *Fourier Transform Infrared (FTIR)* dan *Nuclear Magnetic Resonance (NMR)*. Hasil analisis bilangan oksiran menunjukkan bahwa semakin banyak mol asam asetat dan mol hidrogen peroksida yang ditambahkan akan cenderung meningkatkan nilai oksiran asam oleat terepoksidasi. Kondisi optimum sintesis asam oleat terepoksidasi tanpa menggunakan katalis diperoleh pada saat perbandingan mol antara asam oleat : asam asetat : hidrogen peroksida sebesar 1:4:9 dengan nilai bilangan oksiran sebesar 1,95 dengan konversi bilangan oksiran 62,30 % dan bilangan iod 17,23 g I₂/g sampel. Hasil analisis *FTIR* menunjukkan terbentuknya gugus epoksida pada bilangan gelombang 837 cm⁻¹. Hasil analisis *NMR* juga menunjukkan adanya pergeseran kimia baru pada 2,32 ppm sampai 2,35 ppm (*H-NMR*) dan 72,72 ppm (*C-NMR*) yang berkaitan dengan proton dan karbon yang terikat pada gugus oksiran.

Kata kunci : Asam oleat, Epoksidasi, Oksiran

ABSTRACT

SYNTHESIS OF EPOXIDIZED OLEIC ACID WITH ACETIC ACID AS CATALYST. In this research, the synthesis of epoxidized oleic acid was carried out with the aim of studying the effect of acetic acid and hydrogen peroxide concentration on the epoxidation process of oleic acid without the use of a catalyst. The epoxidation reaction of oleic acid was conducted at 60 °C for 5 hours with a stirring speed of about 525 rpm. The characterization of the epoxidized oleic acid product is done by analyzing the iodine number, the oxiran number, *Fourier Transform Infrared (FTIR)*, and *Nuclear Magnetic Resonance (NMR)* analysis. The oxyran number analysis shows the increase in mole of acetic acid and mole of hydrogen peroxide added will tend to increase the oxiran number of epoxidized oleic acid. The optimum condition of the synthesis of oleic acid epoxidized without the use of a catalyst is obtained when the mole ratio of oleic acid: acetic acid: hydrogen peroxide is 1:4:9, indicated by the oxiran number of 1.95 with the oxiran conversion 62,30% and the iodine number 17,23 g I₂/g sampel. *FTIR* analysis results show the formation of epoxide group at wave number 837 cm⁻¹. The *NMR* analysis also shows a new chemical shift of 2.32 ppm until 2.35 ppm (*H-NMR*) and 72.72 ppm (*C-NMR*) associated with protons and carbon bound to the oxiran group.

Key words : Oleic acid, Epoxidation, Oxiran

PENDAHULUAN

Epoksidasi merupakan metode yang sederhana dan efisien untuk memperoleh senyawa baru yang reaktif dan banyak digunakan dengan cara merubah ikatan rangkap C=C yang ada dalam asam lemak dan minyak nabati menjadi epoksida (Jalil *et al.* 2014; (Salimon, Salih, and Yousif 2011). Senyawa

epoksida dapat digunakan sebagai bahan baku untuk sintesis berbagai bahan kimia seperti alkohol, glikol, alkanolamina, senyawa karbonil, senyawa olefinik, poliester, poliuretan dan resin epoksi (Jalil *et al.* 2014). Metode epoksidasi pada umumnya dilakukan dengan epoksidasi katalitik menggunakan resin pertukaran ion

asam, epoksidasi *chemo-enzymatic* serta epoksidasi dengan katalis logam (Bouchareb and Benaniba 2008); (Tan and Chow 2010). Asam perasetat merupakan asam perkarboksilat yang paling sering digunakan karena mudah didapatkan, murah, efisien dan stabil (de Haro et al. 2016). Namun, perasam organik harus dibentuk secara *in situ* karena perasam pekat tidak stabil dan dapat menyebabkan ledakan. Epoksidasi *in situ* terjadi dalam dua reaksi simultan, yaitu reaksi *reversible* pembentukan perasam dari hidrogen peroksida dan asam asetat serta epoksidasi senyawa tak jenuh (de Haro et al. 2016).

Mungroo et al. (2008), melakukan epoksidasi minyak Canola yang memiliki 60 % asam oleat dan 20 % asam linoleat menggunakan hidrogen peroksida dan asam asetat dengan resin pertukaran ion asam Amberlite IR 120H. Konversi bilangan iod optimum yang didapat sebesar 88.4 % dengan konversi relatif oksiran sebesar 90 %. Orellana-Coca et al. (2005), melakukan epoksidasi *chemo-enzymatic* asam oleat dan metil esternya menggunakan hidrogen peroksida dan lipase terimmobilisasi dari *Candida Antartica*. Konversi asam oleat menjadi produk epoksida mendekati 90 % dengan waktu reaksi selama 6 jam pada 50 °C. Reaksi epoksidasi secara *chemo-enzymatic* biasanya lebih selektif (Silva et al. 2011; Guidotti et al. 2011). Pada reaksi epoksidasi *chemo-enzymatic*, enzim biasanya mengkatalisis pembentukan perasam dari asam lemak dan hidrogen peroksida (Kotlowska et al. 2011), kemudian perasam secara spontan mentransfer oksigen ke ikatan rangkap asam lemak membentuk epoksida (Törnvall et al. 2007). Epoksidasi asam oleat menggunakan katalis PSCI-Amano Lipase juga telah dilakukan oleh (Corrêa et al. 2012). Pada epoksidasi asam oleat dengan pemanasan dan radiasi microwave, suhu, jumlah asam asetat dan hidrogen peroksida akan berpengaruh terhadap laju proses epoksidasi dan pembukaan cincin (Aguilera et al. 2016). (Gerbase et al. 2002) menggunakan katalis methyltrioxorhenium (MTO)-CH₂Cl₂/H₂O₂ untuk epoksidasi minyak kedelai. Konversi total dari ikatan rangkap dan selektivitas sebesar 95 % didapatkan pada suhu ruang selama 2 jam reaksi. Epoksidasi minyak biji anggur (de Haro et al. 2016) dan minyak wijen (Musik and Milchert 2017) dengan asam perasetat menggunakan katalis asam sulfat juga telah dilakukan untuk mendapatkan senyawa epoksida.

Kelemahan reaksi epoksidasi dengan menggunakan katalis logam yakni sulitnya pemisahan dan pemurnian produk dari katalis tersebut (Gerbase et al. 2002; Guidotti et al. 2011). Kelemahan penggunaan katalis asam kuat yaitu dapat menyebabkan korosi pada

peralatan yang digunakan selama proses dan harus dinetralkan dan dipisahkan dari produk akhir, sehingga membutuhkan biaya yang lebih mahal untuk proses pemurnian (Lathi and Mattiasson 2007; Saurabh et al. 2011).

Sebagai upaya untuk mengurangi kelemahan epoksidasi dengan katalis asam kuat, maka pada penelitian ini proses epoksidasi asam oleat dilakukan menggunakan hidrogen peroksida dan asam asetat tanpa menggunakan katalis asam kuat. Selain sebagai reaktan, asam asetat juga dapat berfungsi sebagai katalis pada pembentukan asam peroksiasetat yang diperlukan untuk pembentukan cincin epoksi (Goud et al. 2010). Menurut Milchert et al. (2009), reaksi epoksidasi dengan asam peroksiasetat tidak memerlukan katalis. Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis asam oleat terepoksidasi dan mempelajari pengaruh konsentrasi asam asetat dan hidrogen peroksida pada proses epoksidasi asam oleat menggunakan katalis asam asetat. Penelitian ini perlu dilakukan karena pada umumnya sintesis minyak nabati terepoksidasi dilakukan dengan bantuan katalis asam kuat, logam maupun enzim, sehingga dengan adanya penelitian ini diharapkan dapat menambah informasi tentang sintesis asam oleat terepoksidasi dengan katalis asam asetat.

BAHAN DAN METODE

Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu asam oleat teknis dengan nilai bilangan Iod 51,27 g I₂/g sampel, asam asetat (Merck), hidrogen peroksida (Merck), karbon tetraklorida (Sigma), kalium iodide (Merck), natrium thiosulfate (Merck), indikator amilum, indikator kristal violet, hidrogen bromida (Merck), natrium klorida dan aquadest. Sedangkan peralatan yang digunakan yaitu labu leher tiga, Buchi rotavapor R-124 yang dilengkapi dengan waterbath B-480 dan recirculating chiller B-740, FTIR Shimadzu IR Prestige 21 dan NMR JEOL ECS 400.

Metode

Sintesis EOA (*Epoxidized Oleic Acid / EOA*) dilakukan dengan mereaksikan asam oleat, asam asetat dan hidrogen peroksida dalam labu leher tiga pada suhu 60 °C selama 5 jam dengan kecepatan pengadukan sekitar 525 rpm. Produk yang dihasilkan kemudian dinetralkan hingga pH 7 dengan cara dicuci menggunakan air. Untuk mempercepat pemisahan antara produk dengan air, ditambahkan larutan NaCl. Setelah produk yang dihasilkan netral, kemudian pelarut yang masih tersisa dihilangkan dengan cara evaporasi menggunakan alat *rotary evaporator*. Variasi

komposisi reaktan asam oleat : asam asetat : hidrogen peroksida ditunjukkan pada Tabel 1 dengan 6 variasi komposisi.

Pada variasi komposisi 1, sebanyak 1 mol asam oleat direaksikan dengan 2 mol asam asetat dan 4 mol hidrogen peroksida. Kemudian pada proses selanjutnya dilakukan variasi komposisi reaktan dengan cara meningkatkan jumlah mol asam asetat menjadi 2 mol dan 4 mol, sedangkan komposisi hidrogen peroksida juga ditingkatkan menjadi 6 mol dan 9 mol. Variasi komposisi asam asetat dan hidrogen peroksida digunakan ini untuk mengetahui pengaruh konsentrasi asam asetat dan hidrogen peroksida terhadap pembentukan gugus epoksida dalam *EOA* yang dihasilkan.

Produk *EOA* kemudian dikarakterisasi secara kuantitatif dan kualitatif. Analisis kuantitatif dilakukan dengan cara menghitung kandungan bilangan iod (SNI 01-3555-1998) dan bilangan oksiran (*ASTM D1652-97*).

$$\text{Bilangan Iod (IV)} = \frac{(B-S) \times N \times 12,69}{m} \quad (1)$$

B = volume titrasi blanko (ml)
S = volume titrasi sampel (ml)
N = normalitas natrium tiosulfat (N)
m = berat sampel (g)

$$\text{Bilangan Oksiran (OO}_{\text{exp}}) = \frac{(S-B) \times 1,6 \times N}{m} \quad (2)$$

B = volume titrasi blanko (ml)
S = volume titrasi sampel (ml)
N = normalitas HBr (N)
m = berat sampel (g)

Nilai bilangan oksiran maksimal secara teoritis dihitung berdasarkan persamaan di bawah ini (Hazmi *et al.*, 2013):

$$OO_{th} = \left\{ \frac{(IV_0/2A_i)}{100 + (IV_0/2A_i)A_0} \right\} \times A_0 \times 100 \quad (3)$$

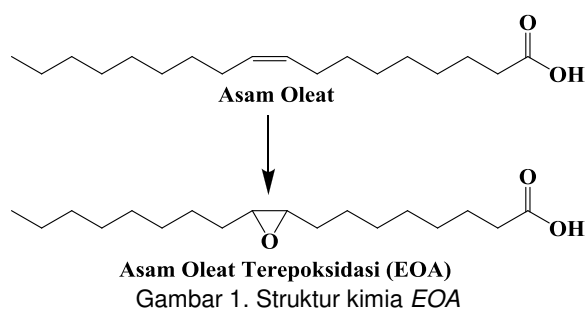
IV₀ = nilai bilangan iod asam oleat
A_i = berat molekul iodin = 126,9
A_o = berat molekul oksigen = 16

Analisis kualitatif dilakukan dengan menggunakan *Fourier Transform Infrared (FTIR)* pada bilangan gelombang 4000 cm⁻¹ - 400 cm⁻¹, resolusi 4cm⁻¹ dan *Nuclear Magnetic Resonance (NMR)* menggunakan pelarut kloroform.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sintesis *EOA* pada prinsipnya bertujuan untuk mendapatkan senyawa *EOA* dengan merubah ikatan rangkap C=C menjadi gugus epoksida melalui proses epoksidasi. Struktur kimia *EOA* ditunjukkan pada Gambar 1.

Analisis kuantitatif *EOA* dilakukan dengan analisis bilangan iod dan bilangan oksiran. Analisis bilangan iod dilakukan untuk mengetahui dan membandingkan jumlah ikatan rangkap C=C asam oleat dan *EOA*, sehingga dapat mengetahui berapa jumlah ikatan rangkap C=C dalam asam oleat yang terkonversi menjadi gugus epoksida. Sedangkan bilangan oksiran untuk mengetahui jumlah kandungan gugus epoksida dalam *EOA*. Hasil analisis bilangan iod dan bilangan oksiran pada berbagai komposisi reaktan ditunjukkan pada Tabel 2.



Gambar 1. Struktur kimia *EOA*

Tabel 1. Variasi komposisi reaktan sintesis *EOA*

Variasi komposisi	Asam oleat (mol)	Asam asetat (mol)	Hidrogen peroksida (mol)
1	1	2	4
2	1	2	6
3	1	2	9
4	1	4	6
5	1	4	9
6	1	6	9

Pada Tabel 2. terlihat bahwa nilai konversi bilangan oksiran paling tinggi sebesar 62,30 % didapatkan pada sintesis EOA pada variasi komposisi 5. Penentuan konversi EOA didasarkan pada nilai konversi bilangan oksiran, bukan bilangan iod karena bilangan oksiran menunjukkan banyaknya cincin oksiran yang terbentuk dalam EOA, sedangkan bilangan iod menunjukkan banyaknya ikatan rangkap C=C dalam EOA, sehingga bilangan iod tidak dapat menjadi dasar penentuan konversi optimum karena ikatan rangkap C=C yang terkonversi menjadi cincin oksiran juga dapat putus dan membentuk senyawa dihidroksi asam oleat (Varshney, Ahmad, and Rauf 2013; Salimon et al. 2016). Oleh karena itu nilai bilangan iod yang terkecil tidak dapat dijadikan dasar penentuan konversi optimum pembentukan cincin oksiran. Pada variasi komposisi 1 hingga komposisi 3 menunjukkan semakin banyak mol asam asetat dan mol hidrogen peroksida yang ditambahkan akan semakin meningkatkan nilai oksiran EOA. Semakin meningkatnya nilai oksiran EOA ini disebabkan karena semakin banyak mol asam asetat dan mol hidrogen peroksida maka kecepatan reaksi pembentukan cincin epoksi akan semakin meningkat bersamaan dengan meningkatnya frekuensi terjadinya tumbukan antar molekul-molekul (Okieimen et al., 2002). Namun, pada saat variasi komposisi 6 menunjukkan nilai konversi bilangan oksiran EOA menurun menjadi 38,05 %.

Pada variasi komposisi 6. tersebut, EOA yang dihasilkan menunjukkan nilai bilangan iod sebesar 11,250 g I₂/g sampel, nilai bilangan iod ini lebih kecil daripada nilai bilangan iod pada variasi komposisi 5 yaitu sebesar 17,230 g I₂/g sampel, namun nilai konversi oksirannya juga lebih kecil yaitu sebesar 38,05 % karena cincin epoksida yang terbentuk pada variasi komposisi 6 tersebut putus dan membentuk senyawa dihidroksi asam oleat seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2. Hal ini disebabkan karena reaksi epoksidasi telah melewati kesetimbangannya yang berakibat reaksi

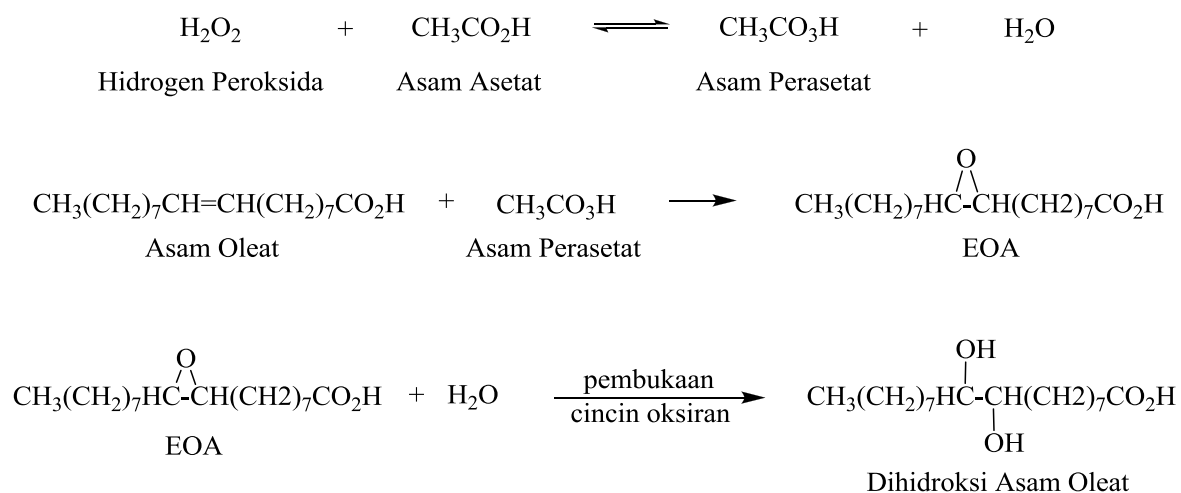
oksidasi ikatan rangkap tidak berjalan optimal. Reaksi pembentukan asam peroksiasetat merupakan reaksi reversibel. Pada saat reaksi mencapai kesetimbangan, bertambahnya hidrogen peroksida tidak berperan besar dalam konversi asam asetat menjadi asam peroksiasetat bahkan akan terdekomposisi kembali menjadi asam asetat. Dengan bertambahnya jumlah hidrogen peroksida maka akan menambah jumlah air sehingga dapat mengakibatkan putusnya cincin oksiran menjadi senyawa dihidroksi dan menurunkan bilangan oksiran seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.

Karakterisasi FTIR dilakukan untuk mengetahui adanya perubahan gugus fungsi yang terjadi sebelum dan setelah reaksi epoksidasi. Perubahan gugus fungsi dapat terlihat dengan adanya pergeseran atau munculnya puncak serapan baru pada bilangan gelombang tertentu. Hasil analisis FTIR asam oleat dan EOA ditunjukkan pada Gambar 3.

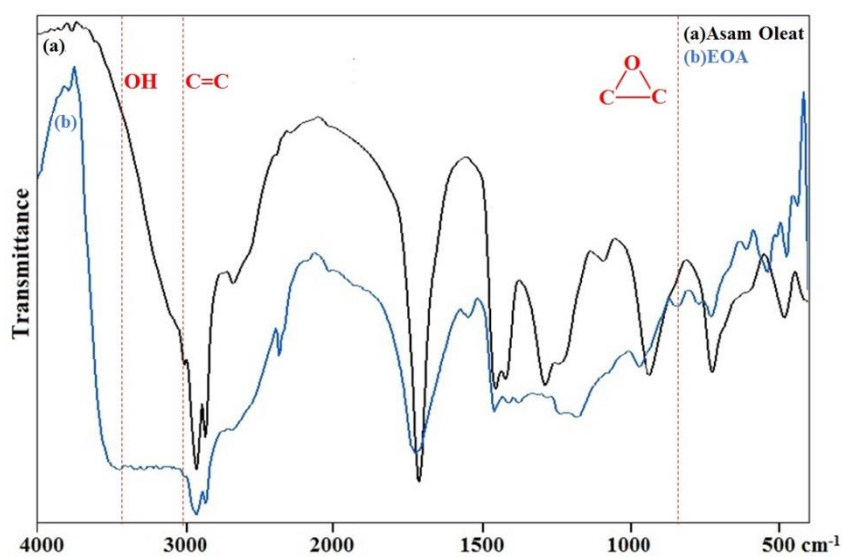
Spektrum FTIR asam oleat (Gambar 3a.) menunjukkan adanya puncak serapan pada bilangan gelombang 3003 cm⁻¹ yang menunjukkan adanya ikatan rangkap gugus -CH=CH-. Namun, pada spektrum FTIR EOA (Gambar 3b.), puncak serapan pada bilangan gelombang 3003 cm⁻¹ tersebut sangat menurun intensitasnya. Penurunan intensitas ini mengindikasikan penurunan ikatan rangkap -CH=CH- dalam EOA. Selain itu, pada spektrum EOA juga muncul puncak serapan baru pada bilangan gelombang 837 cm⁻¹ yang mengindikasikan adanya gugus epoksida (Hazmi et al. 2013). Pada EOA juga muncul puncak serapan baru pada bilangan gelombang 3342 cm⁻¹ - 3439 cm⁻¹ yang berhubungan dengan gugus hidroksil OH. Munculnya gugus hidroksil OH ini berasal dari putusnya sebagian gugus epoksida menjadi senyawa dihidroksi asam oleat. Hadirnya gugus epoksida dan hilangnya ikatan rangkap C=C pada EOA telah membuktikan bahwa sintesis EOA melalui proses epoksidasi telah berhasil dilakukan.

Tabel 2. Nilai bilangan iod dan oksiran EOA berbagai komposisi

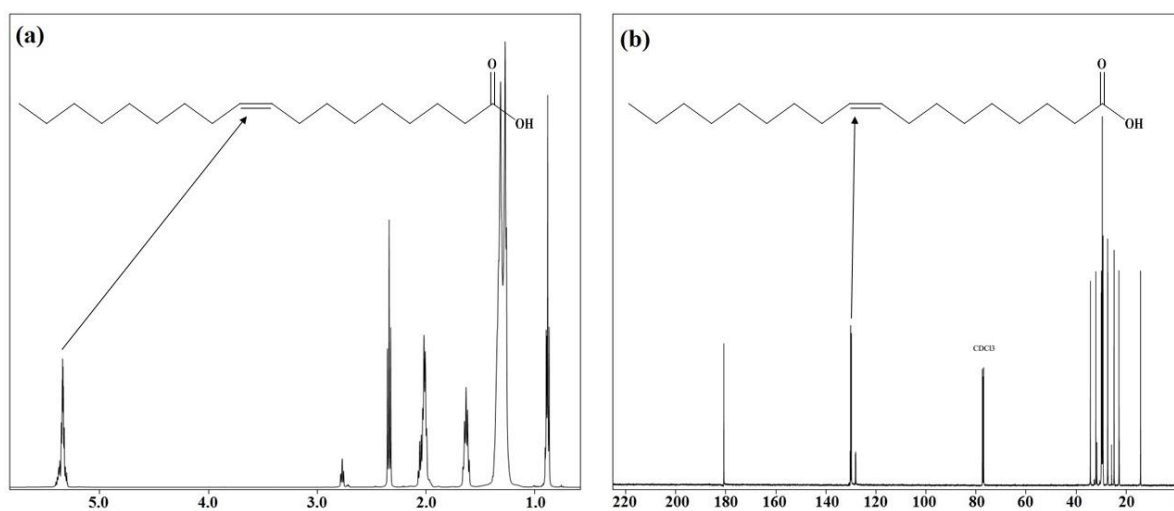
Variasi komposisi	Komposisi reaktan			Bilangan iod (g I ₂ /g sampel)	Bil. oksiran	Konversi Bil. Oksiran (%)
	Asam oleat (mol)	Asam asetat (mol)	Hidrogen peroksida (mol)			
1	1	2	4	14,775	0,907	28,98
2	1	2	6	14,787	0,895	28,59
3	1	2	9	15,204	1,300	41,53
4	1	4	6	11,630	1,445	46,17
5	1	4	9	17,230	1,950	62,30
6	1	6	9	11,250	1,191	38,05
		Asam oleat	51,27	3,13		



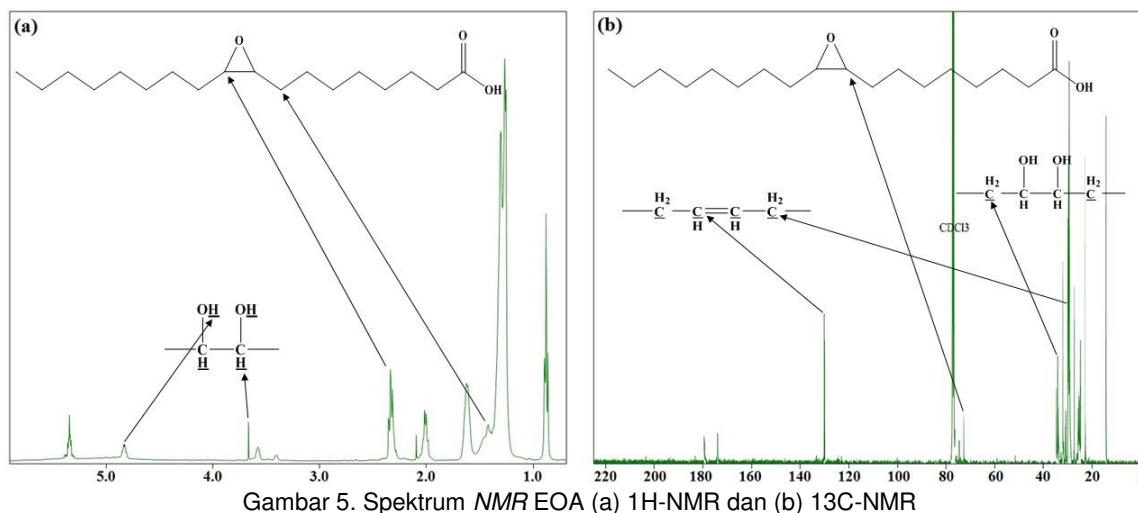
Gambar 2. Reaksi pembentukan asam peroksiasetat, epoksidasi dan dihidroksi



Gambar 3. Spektrum FTIR (a) Asam oleat dan (b) EOA



Gambar 4. Spektrum NMR asam oleat (a) 1H-NMR dan (b) 13C-NMR



Gambar 5. Spektrum NMR EOA (a) ^1H -NMR dan (b) ^{13}C -NMR

Pada penelitian ini karakterisasi struktur kimia asam oleat dan EOA dilakukan menggunakan H -NMR dan C -NMR. Analisis H -NMR dilakukan untuk mengetahui pergeseran kimia proton, sedangkan analisis C -NMR dilakukan untuk mengetahui pergeseran kimia karbon. Hasil analisis NMR asam oleat ditunjukkan pada Gambar 4., sedangkan hasil analisis NMR EOA ditunjukkan pada Gambar 5.

Pada spektrum H -NMR asam oleat (Gambar 4a.) terdapat pergeseran kimia pada 5,34 ppm yang berkaitan dengan ikatan rangkap $-\text{CH}=\text{CH}-$. Sedangkan pada spektrum H -NMR EOA (Gambar 5a.) terdapat pergeseran kimia baru pada 1,42 ppm yang berasal dari proton CH_2 yang terikat pada $\text{H}_2\text{C}-\text{CH}-\text{O}-\text{CH}-\text{CH}_2$. Selain itu terlihat juga pergeseran kimia baru pada 2,32 ppm hingga 2,35 ppm yang menunjukkan proton CH yang terikat pada $\text{HC}-\text{O}-\text{CH}$ dan tumpang tindih dengan proton CH_2 yang terikat pada $\text{H}_2\text{C}=\text{O}(\text{OH})$. Tumpang tindihnya puncak tersebut diperoleh dari hasil perbandingan jumlah proton (integrasi) pada daerah pergeseran kimia 2,32 ppm hingga 2,35 ppm yang menunjukkan adanya proton yang berlebih.

Pada spektrum H -NMR EOA juga menunjukkan adanya pergeseran kimia baru pada 3,66 ppm dan 4,83 ppm. Pergeseran kimia 3,66 ppm berasal dari ikatan $-\text{CH}-$, sedangkan pergeseran kimia 4,83 ppm dari ikatan $-\text{OH}$. Pergeseran kimia tersebut berasal dari proton yang terikat pada $\text{HC}(\text{OH})-(\text{OH})\text{CH}$ yang disebabkan adanya pembukaan cincin oksiran seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2. Hasil analisis H -NMR tersebut diatas menunjukkan bahwa produk EOA masih dalam bentuk campuran yang terdiri dari asam oleat, EOA dan senyawa dihidroksi asam oleat.

Pada spektrum C -NMR EOA (Gambar 5b.) juga menunjukkan masih adanya campuran antara asam oleat, EOA dan dihidroksi asam oleat. Masih adanya asam oleat pada produk EOA hal ini ditunjukkan dengan masih adanya

puncak yang menunjukkan karbon yang terikat pada $-\text{CH}=\text{CH}-$ di daerah pergeseran kimia 130,19 ppm dan karbon yang terikat pada $-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-$ di daerah pergeseran kimia 29,24 ppm. Pada spektrum C -NMR EOA juga menunjukkan adanya pergeseran kimia di daerah 72,72 ppm yang berkaitan dengan dari karbon yang terikat pada gugus oksiran $\text{HC}-\text{O}-\text{CH}$ dan tumpang tindih dengan puncak dari karbon yang terikat pada senyawa dihidroksi asam oleat $\text{OH}-\text{HC}-\text{CH}-\text{OH}$. Terbentuknya senyawa dihidroksi asam oleat juga ditunjukkan oleh adanya puncak di daerah pergeseran kimia 34,19 ppm yang berasal dari karbon yang terikat pada $\text{H}_2\text{C}-\text{CH}(\text{OH})-\text{CH}(\text{OH})-\text{CH}_2$.

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan semakin banyak mol asam asetat dan mol hidrogen peroksida yang digunakan untuk sintesis EOA, maka semakin meningkat pula nilai oksiran EOA. Kondisi optimum pada sintesis EOA didapatkan pada perbandingan mol asam oleat : asam asetat : hidrogen peroksida adalah 1:4:9 dengan nilai bilangan oksiran yang dihasilkan sebesar 1,95, konversi bilangan oksiran 62,30 % dengan bilangan iod 17,23 g I_2/g sampel. Hasil analisis FTIR telah mengindikasikan hadirnya gugus epoksida dalam EOA dengan adanya puncak serapan baru pada bilangan gelombang 837 cm^{-1} . Hasil analisis H -NMR dan C -NMR juga membuktikan hadirnya gugus epoksida pada pergeseran kimia pada 2,32-2,35 ppm dan 72,72 ppm.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh Kementerian Riset, Teknologi dan Perguruan Tinggi melalui Program Insinas. Penulis juga mengucapkan terimakasih kepada Dr. Agus Haryono dan Dr.

Nino Rinaldi yang telah membantu selama penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Aguilera, A.F., P.Tolvanen, K. Eränen, S. Leveneur, and T. Salmi. 2016. "Epoxidation of Oleic Acid under Conventional Heating and Microwave Radiation." *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 102. Elsevier B.V.: 70–87. doi:10.1016/j.cep.2016.01.011.
- "ASTM D1652-97 Standard Test Methods for Epoxy Content of Epoxy Resins." 1997. In *ASTM International*, D1652-97. West Conshohocken, PA. doi:10.1520/D1652-97.
- Bouchareb, B., and M.T. Benaniba. 2008. "Effects of Epoxidized Sunflower Oil on the Mechanical and Dynamical Analysis of the Plasticized Poly(vinyl Chloride)." *Journal of Applied Polymer Science* 107: 3442–50. doi:10.1002/app.
- Corrêa, F. De A., F. K. Sutili, L. S M Miranda, S. G. F Leite, R.O.M.A. De Souza, and I.C.R. Leal. 2012. "Epoxidation of Oleic Acid Catalyzed by PSCI-Amano Lipase Optimized by Experimental Design." *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic* 81. Elsevier B.V.: 7–11. doi:10.1016/j.molcatb.2012.03.011.
- Gerbase, A.E., J.R. Gregório, M.Martinelli, M.C. Brasil, and A.N.F. Mendes. 2002. "Epoxidation of Soybean Oil by the Methyltrioxorhenium-CH₂Cl₂/H₂O₂ Catalytic Biphasic System." *Journal of the American Oil Chemists' Society* 79: 179–81. doi:10.1007/s11746-002-0455-0.
- Guidotti, M., E. Gavrilova, A. Galarneau, B. Coq, R. Psaro, and N. Ravasio. 2011. "Epoxidation of Methyl Oleate with Hydrogen Peroxide. The Use of Ti-Containing Silica Solids as Efficient Heterogeneous Catalysts." *Green Chemistry* 13 (7): 1806–11. doi:10.1039/c1gc15151g.
- Haro, J. C. de, I. Izarra, J. F. R., Á. Pérez, and M. Carmona. 2016. "Modelling the Epoxidation Reaction of Grape Seed Oil by Peracetic Acid." *Journal of Cleaner Production* 138: 70–76. doi:10.1016/j.jclepro.2016.05.015.
- Hazmi, A. S. Ahmad, Aung, M Min, M. Z Salleh, A.L. Chuah. 2013. "Producing Jatropa Oil-Based Polyol via Epoxidation and Ring Opening." *Industrial Crops and Products* 50 (August 2016): 563–67. doi:10.1016/j.indcrop.2013.08.003.
- Jalil, M. Jumain, N. Mohamed, S. K. Jamaludin, A.M. Som, and A.R.M. Daud. 2014. "Epoxidation of Palm Kernel Oil-Based Crude Oleic Acid." *Advanced Materials Research* 906 (April): 125–30. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.906.125.
- Kotowska, A.J., F. van Rantwijk, R. A. Sheldon, and I.W.C.E. Arends. 2011. "Epoxidation and Baeyer–Villiger Oxidation Using Hydrogen Peroxide and a Lipase Dissolved in Ionic Liquids." *Green Chemistry* 13 (8): 2154. doi:10.1039/c1gc15255f.
- Lathi, P.S, and B.Mattiasson. 2007. "Green Approach for the Preparation of Biodegradable Lubricant Base Stock from Epoxidized Vegetable Oil." *Applied Catalysis B: Environmental* 69: 207–12. doi:10.1016/j.apcatb.2006.06.016.
- Milchert, E., and A. Smagowicz. 2009. "The Influence of Reaction Parameters on the Epoxidation of Rapeseed Oil with Peracetic Acid." *Journal of the American Oil Chemists' Society* 86 (12): 1227–33. doi:10.1007/s11746-009-1455-7.
- Mungroo, R., N.C. Pradhan, Vaibhav V.G., and A.K. Dalai. 2008. "Epoxidation of Canola Oil with Hydrogen Peroxide Catalyzed by Acidic Ion Exchange Resin." *JAOCS, Journal of the American Oil Chemists' Society* 85 (9): 887–96. doi:10.1007/s11746-008-1277-z.
- Musik, M., and E. Milchert. 2017. "Selective Epoxidation of Sesame Oil with Peracetic Acid." *Molecular Catalysis* 433. Elsevier B.V.: 170–74. doi:10.1016/j.mcat.2017.02.012.
- Okieimen, F. E., O. I. Bakare, and C. O. Okieimen. 2002. "Studies on the Epoxidation of Rubber Seed Oil." *Industrial Crops and Products* 15 (2): 139–44. doi:10.1016/S0926-6690(01)00104-2.
- Orellana-Coca, C., U. Törnqvall, D. Adlercreutz, B. Mattiasson, and R. Hatti-Kaul. 2005. "Chemo-Enzymatic Epoxidation of Oleic Acid and Methyl Oleate in Solvent-Free Medium." *Biocatalysis and Biotransformation* 23 (6): 431–37. doi:10.1080/10242420500389488.
- Salimon, J., B. M. Abdullah, and N. Salih. 2016. "Optimization of the Oxirane Ring Opening Reaction in Biolubricant Base Oil Production." *Arabian Journal of Chemistry* 9: S1053–58. doi:10.1016/j.arabjc.2011.11.002.
- Salimon, J., N.Salih, and E. Yousif. 2011. "Chemically Modified Biolubricant Basestocks from Epoxidized Oleic Acid: Improved Low Temperature Properties and Oxidative Stability." *Journal of Saudi Chemical Society* 15 (3). King Saud University: 195–201. doi:10.1016/j.jscs.2010.08.004.
- Saurabh, T., M. Patnaik, S.L. Bhagat, and V.C. Renge. 2011. "Epoxidation of Vegetable

- Oils : A Review," no. Iv.
- Silva, W.S.D., A.A.M. Lapis, P.A.Z. Suarez, and B.A.D. Neto. 2011. "Enzyme-Mediated Epoxidation of Methyl Oleate Supported by Imidazolium-Based Ionic Liquids." *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic* 68 (1). Elsevier B.V.: 98–103. doi:10.1016/j.molcatb.2010.09.019.
- "SNI 01-3555-1988." 1998. In *Cara Uji Minyak Dan Lemak*. Badan Standarisasi Nasional.
- Tan, S. G., and W. S. Chow. 2010. "Biobased Epoxidized Vegetable Oils and Its Greener Epoxy Blends: A Review." *Polymer - Plastics Technology and Engineering* 49 (15): 1581–90. doi:10.1080/03602559.2010.512338.
- Törnvall, U., C. Orellana-Coca, R. Hatti-Kaul, and D. Adlercreutz. 2007. "Stability of Immobilized Candida Antarctica Lipase B during Chemo-Enzymatic Epoxidation of Fatty Acids." *Enzyme and Microbial Technology* 40 (3): 447–51. doi:10.1016/j.enzmictec.2006.07.019.
- Vaibhav V. G., S. Dinda, A.V. Patwardhan and N.C. Pradhan. 2010. "Epoxidation of Jatropha (Jatropha Curcas) Oil by Peroxyacids." *Asia-Pacific Journal Of Chemical Engineering* 5: 346–54. doi:10.1002/apj.
- Varshney, H., A. Ahmad, and A. Rauf. 2013. "Ring Opening of Epoxy Fatty Esters by Nucleophile to Form the Derivatives of Substituted β -Amino Alcohol" 2013 (September): 21–24.